

硅太阳能电池的调制载流子红外辐射动态响应与参数分析

刘俊岩¹⁾ 秦雷¹⁾ 宋鹏¹⁾ 龚金龙¹⁾ 王扬^{1)†} A. Mandelis²⁾

1) (哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150001)

2) (Center for Advanced Diffusion Wave Technologies (CADIFT), Mechanical and Industrial Engineering, University of Toronto, Toronto, Ontario, M5S 3G8, Canada)

(2014年5月31日收到; 2014年7月25日收到修改稿)

建立了调制激光诱发硅太阳能电池的少数载流子密度波数学模型, 并利用光致载流子辐射检测掺杂浓度、阻抗及载流子输运参数. 对频域响应曲线中的双弯曲效应进行了研究, 构建了小交流信号作用的太阳能电池等效电路拓扑结构, 仿真分析了不同掺杂浓度、阻抗电阻和载流子传输参数对频响曲线拐点的影响. 通过光致载流子辐射频域扫描实验与多参数拟合检测了单晶硅太阳电池的施/受主浓度、并联电阻和载流子输运参数. 结果表明: 光致载流子辐射技术检测大面积太阳能电池频响曲线的双弯曲是由电容效应所引起的, 建立的数学模型可定量描述和预测检测结果, 并用于测量太阳能电池的掺杂浓度、电阻和载流子输运参数.

关键词: 调制自由载流子辐射, 扫频检测, PN结电容, 参数测量

PACS: 78.20.Ci, 72.20.Jv, 07.60.Dq

DOI: 10.7498/aps.63.227801

1 引言

硅基太阳能电池制造过程中要进行n区和p区掺杂操作(n区施主浓度 N_d , p区受主浓度 N_a)以制作太阳能电池的中性区与耗尽区, 掺杂后载流子的输运参数(载流子寿命 τ , 载流子扩散系数 D , 表面复合速率 S)均会发生变化, 并且由于电池表面污损、旁路漏电等原因而引入了并联电阻 R_{sh} ^[1-3], 这些参数是影响太阳能电池品质的重要参量, 因此对其测量是太阳能电池检测的一个重要方面^[4,5].

调制载流子辐射检测技术(photocurrent radiometry, PCR)由多伦多大学Mandelis等^[6]提出, 其信号与少数载流子密度(或浓度)直接相关. 采用近红外波段探测少数载流子辐射复合发光信号, 结合锁相技术可以得到半导体材料或太阳能电池激光诱发少数载流子辐射复合发光的频域动态响应, 由于采用锁相技术与短波红外技术相结合的探测方式, 检测信号纯净、激发源单一. 经Li

等^[7]提出掺杂硅的三层理论模型可用于检测半导体的载流子输运参数, 可以用于太阳能电池的载流子参数、电参数和掺杂浓度等多种参数的测定, 还可以用于缺陷检测等多方面的应用, 可以减少半导体制造业中繁琐的测量设备. 太阳能电池的掺杂浓度及面积等对调制激光诱发载流子辐射复合发光PCR信号的频域响应具有较大影响, 当太阳能电池面积较小或施加较大前向偏置电压条件下, 调制激光诱发载流子辐射复合发光PCR信号的频域响应曲线在高频段仅存在一个转折频率. 一般情况下, 这个转折频率与太阳能电池基体的少数载流子传输参数有关^[8]. 对于太阳能电池面积较大且施加前向偏置电压较小, 调制激光诱发载流子辐射复合发光PCR信号的频域响应曲线会存在两个转折频率(称为PCR频响曲线双弯曲), 因此有必要对PCR检测太阳能电池的频域响应特性进行深入研究.

本文建立了基于电容效应的调制激光诱发单晶硅太阳能电池少数载流子密度波数学模型, 分析

† 通讯作者. E-mail: wyyh@hit.edu.cn

了不同激光激发参数和太阳能电池电特性的 PCR 信号频域动态响应特性, 通过仿真研究了电池的掺杂浓度、阻抗电阻和载流子输运参数对少数载流子密度波频域响应的影响, 并通过频域扫描试验和多参数拟合方法测量了面积为 $12.5 \text{ cm} \times 12.5 \text{ cm}$ 单晶硅太阳能电池的掺杂浓度、阻抗电阻和载流子输运参数等.

2 调制激光诱发硅太阳能电池的少数载流子密度波

2.1 少数载流子的一维扩散-复合方程

硅太阳能电池吸收超带隙激光(光子能量超过带隙能)会产生少数载流子(电子-空穴对), 少数载流子在太阳能电池耗尽区和准中性区通过扩散、迁移和复合等过程进行输运. 输运过程中, 少数载流子可通过直接辐射复合而发光, 其发光波长由带隙能决定^[9]. 调制激光的光强按照正弦规律变化, 其光强可如式(1)所示:

$$I(t) = \frac{I_0}{2}(1 + e^{i\omega t}) = \frac{I_0}{2}(1 + e^{i2\pi f t}), \quad (1)$$

式中 I_0 为激光最大光强 [W/cm^2]; ω , f 为激光调制的角频率与频率, $\omega = 2\pi f$.

调制激光激发硅太阳能电池时, 其中性区与耗尽区如图 1 所示, 耗尽区两端产生电势, 其电势随时间变化.

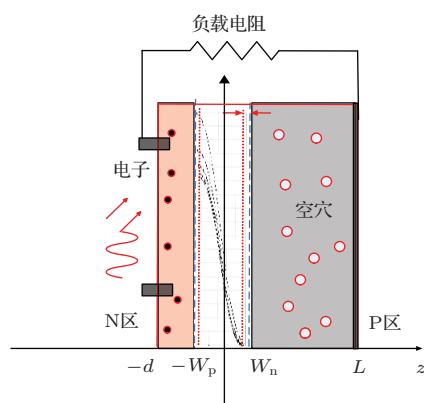


图 1 调制激发下的太阳能电池的载流子分布原理图

在低注入条件下, 太阳能电池准中性区的过剩少数载流子一维分布满足如下关系^[10]:

$$D_n \nabla^2 \Delta n(z, t) - \frac{\partial \Delta n(z, t)}{\partial t} - \frac{\Delta n(z, t)}{\tau_n} + g(z, t) = 0 \quad (-d \leq z \leq -W_p), \quad (2a)$$

$$D_p \nabla^2 \Delta p(z, t) - \frac{\partial \Delta p(z, t)}{\partial t} - \frac{\Delta p(z, t)}{\tau_p} + g(z, t) = 0 \quad (W_n \leq z \leq L), \quad (2b)$$

式中, $\Delta n(z, t)$, $\Delta p(z, t)$ 分别为过剩少数电子与空穴密度 [cm^{-3}]; D_n , D_p 为电子与空穴的扩散系数 [$\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]; τ_n , τ_p 为电子与空穴的寿命 [μs]; $g(z, t)$ 为载流子产生率.

太阳能电池吸收光强按正弦调制的激光, 其强度的分布满足 Beer-Lambert 规律, 则调制激光照射太阳能电池的载流子产生率可由(3)式得

$$g(z, t) = \frac{\beta(\hbar\omega_{in}) \cdot (1 - R) \cdot \eta \cdot I_0}{2\hbar\omega_{in}} \times e^{-\beta(\hbar\omega_{in}) \cdot z} (1 + e^{i\omega t}), \quad (3)$$

式中 $\hbar\omega_{in}$, $\beta(\hbar\omega_{in})$ 为光子能量与吸收系数, 为简单起见, $\beta(\hbar\omega_{in}) = \beta$ [cm^{-1}]; R 为太阳能电池表面反射率; η 为光子产生载流子的量子效率.

将(3)式代入(2a)和(2b)式, 并进行 Fourier 变换, 可得到频域 Fourier 变换下的载流子传输方程.

$$\begin{aligned} \nabla^2 \Delta n(z, \omega) - \left(\frac{1 + i\omega\tau_n}{D_n\tau_n} \right) \Delta n(z, \omega) + \frac{G(z, \omega)}{D_n} \\ = 0, \quad (-d \leq z \leq -W_p), \end{aligned} \quad (4a)$$

$$\begin{aligned} \nabla^2 \Delta p(z, \omega) - \left(\frac{1 + i\omega\tau_p}{D_p\tau_p} \right) \Delta p(z, \omega) + \frac{G(z, \omega)}{D_p} \\ = 0 \quad (W_n \leq z \leq L), \end{aligned} \quad (4b)$$

式中 $\Delta n(z, \omega)$, $\Delta p(z, \omega)$, $G(z, \omega)$ 分别为少数电子密度、空穴及载流子产生率的 Fourier 变换.

载流子产生率的 Fourier 变换由(5)式得

$$G(z, \omega) = \frac{\beta \cdot (1 - R) \cdot \eta \cdot I_0}{2\hbar\omega_{in}} \cdot e^{-\beta \cdot z}. \quad (5)$$

载流子密度是准稳态平衡条件下的少数载流子密度, 对于太阳能电池, 吸收调制激光产生载流子会在表面发生复合. 载流子密度满足如下表面边界条件:

$$\begin{cases} D_n \frac{\partial \Delta n(z, \omega)}{\partial z} \big|_{z=-d} = S_n \Delta n(z, \omega) \big|_{z=-d} \\ D_p \frac{\partial \Delta p(z, \omega)}{\partial z} \big|_{z=L} = -S_p \Delta p(z, \omega) \big|_{z=L} \end{cases}, \quad (6)$$

式中 S_n 为前表面载流子表面复合速率 [$\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$]; S_p 为后表面载流子表面复合速率 [$\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$].

在 p-n 结的耗尽层边界处, p-n 结电场产生的偏置电压会使过剩少数载流子快速消耗掉. 对于正向偏置电压, 过剩少数载流子浓度在太阳能电池 p-n 结两端满足 Dirichlet 边界条件:

$$\begin{cases} \Delta n(z, \omega)|_{z=-W_p} = n_0 [e^{qV/k_B T} - 1] \\ \Delta p(z, \omega)|_{z=W_n} = p_0 [e^{qV/k_B T} - 1] \end{cases}, \quad (7)$$

式中 n_0 , p_0 为平衡条件下的 p 区电子与 n 区空穴的密度; k_B 为玻尔兹曼常数; V 为正向偏置电压; q 为基本电荷; T 为温度.

利用格林函数法求解 (4a) 和 (4b) 式, 并利用边界条件可直接得到过剩少数载流子 (电子和空穴) 的密度分布函数.

$$\begin{aligned} \Delta n(z, \omega) &= c_{n1} \cosh[(-z - W_p)/L_{\omega n}] \\ &\quad + c_{n2} \sinh[(-z - W_p)/L_{\omega n}] \\ &\quad + a_n e^{-\beta(z+d)} \quad (-d \leq z \leq -W_p), \end{aligned} \quad (8a)$$

$$\begin{aligned} \Delta p(z, \omega) &= c_{p1} \cosh[(z - W_n)/L_{\omega p}] \\ &\quad + c_{p2} \sinh[(z - W_n)/L_{\omega p}] \\ &\quad + a_p e^{-\beta(z+d)} \quad (W_n \leq z \leq L), \end{aligned} \quad (8b)$$

式中 a_n , c_{n1} , c_{n2} , a_p , c_{p1} , c_{p2} 为系数 (具体形式见附录 1), $L_{\omega n}$, $L_{\omega p}$ 为过剩少数电子与空穴的扩散长度 (具体形式见附录 A).

(8a) 和 (8b) 式分别给出了太阳能电池中性区的频域少数载流子密度一维分布模型, 对于 Si 基太阳能电池, 同质 p-n 结的宽度很小, 其宽度相对于太阳能电池中性区的厚度可忽略不计, 即 $W_p = W_n = 0$. 在低注入条件下, 调制激光诱发太阳能电池的少数载流子辐射复合发光信号 (PCR) 与载流子密度之间满足如下关系 [3]:

$$P(\hbar\omega_{em}) \approx F(\lambda_1, \lambda_2) \left[\int_{-d}^0 \Delta n(z, \omega) dz + \int_0^L \Delta p(z, \omega) dz \right], \quad (9)$$

式中 $\hbar\omega_{em}$, $P(\hbar\omega_{em})$ 为少数载流子辐射复合发光的光子能量与 PCR 信号强度; λ_1 , λ_2 , $F(\lambda_1, \lambda_2)$ 为 PCR 信号的波长范围及相关系数.

(9) 式在频域下为复数量, 由此可得调制激光诱发太阳能电池过剩少数载流子辐射复合发光的幅频与相频特性.

$$|H(\hbar\omega_{em}, \omega)| = \sqrt{\text{Re}[P(\hbar\omega_{em})]^2 + \text{Im}[P(\hbar\omega_{em})]^2}, \quad (10a)$$

$$\varphi(\hbar\omega_{in}, \omega) = \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{Im}[P(\hbar\omega_{em})]}{\text{Re}[P(\hbar\omega_{em})]} \right\}, \quad (10b)$$

式中 Re , Im 为 PCR 信号的实部与虚部.

2.2 小交流信号作用下的太阳能电池阻抗

太阳能电池的电容特性是影响动态特性重要参数, 包括太阳能电池耗散区势垒电容及载流子密度变化引起扩散产生的扩散电容. 对于势垒电容可等效为一个平板电容. 太阳能电池的势垒电容可以由如下公式得到 [8]:

$$C_j = S_c \sqrt{\frac{q\varepsilon_0\varepsilon_s}{2(1/N_d + 1/N_a)(V_{bi} - V)}}, \quad (11a)$$

$$V_{bi} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right), \quad (11b)$$

式中, ε_0 , ε_s 为绝对介电常数与相对介电常数; V_{bi} , V 为耗散区势内建电势与正向偏置电压; N_a , N_d , n_i 为受主、施主掺杂浓度与本征浓度; S_c 为太阳能电池面积.

在低注入条件下, 调制激光照射太阳能电池 p-n 结产生的偏置电压与电流密度变化均为小交流信号, 太阳能电池在小交流信号作用下导纳 (由等效电导和扩散电容组成) 由下式计算得到 [11,12]:

$$\begin{aligned} Y &= G_d + i\omega C_d \\ &= S_c \left(\frac{q^2 n_i^2}{k_B T} \right) \left(\frac{D_p}{N_d L_{\omega p}} + \frac{D_n}{N_a L_{\omega n}} \right) e^{\frac{qV}{k_B T}}, \end{aligned} \quad (12)$$

式中, Y 为小交流信号作用下的导纳; G_d 为等效电导; C_d 为扩散电容.

当采用调制激光照射太阳能电池时, 调制激光的光生电流与太阳能电池的偏置电压变化较小, 满足小信号条件太阳能电池的二极管模型可由等效电容 C 、等效电阻 R_1 与准中性区的序列电阻 R_{ch} 的并联和串联等效势垒电阻 R_{cs} 代替. 图 2 为小交流信号作用的开路条件太阳能电池等效电路模型.

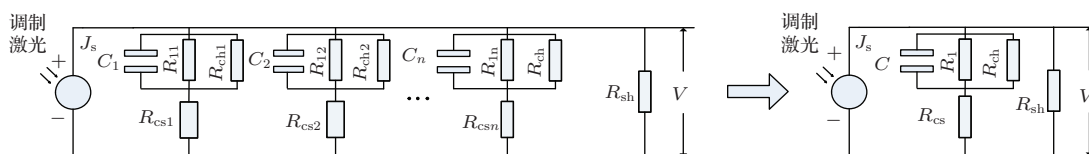


图 2 太阳能电池的电容等效电路

等效电容为势垒电容与扩散电容的并联电容, 其等效电容 C 与等效电阻 R_I 通过如下公式计算:

$$C = C_j + C_d, \quad (13a)$$

$$R_I = 1/\text{Re}(Y). \quad (13b)$$

当电路处于开路状态时, 由太阳能电池电容等效电路可得总阻抗 Z_c 为

$$Z_c = \frac{R_{sh}(R_I R_{ch}/R_{cs} + X_c)}{(1 + R_{sh}/R_{cs})X_c + R_I R_{ch}/R_{cs}}, \quad (14a)$$

$$X_c = j2\pi f C R_I R_{ch} + R_{ch} + R_I, \quad (14b)$$

式中 R_{sh} 为太阳能电池的寄生并联电阻.

在低注入条件下, 太阳能电池吸收光子产生载流子形成的光生电流密度 J_{ph} 与其两端的偏置电压 V 可由下式得

$$J_{ph} = \frac{(1 - R)\eta I_0}{\hbar\omega_{in}} \left[\frac{1 - e^{-\beta(d+L)}}{S_c} \right], \quad (15a)$$

$$V = J_{ph} \cdot Z_c. \quad (15b)$$

由 (8a)—(15b) 式可知, 调制激光诱发太阳能电池的少数载流子辐射复合发光 PCR 信号的幅频与相频特性与载流子输运参数直接相关, 同时也与太阳能电池结构参数、掺杂浓度、阻抗特性及调制激光激发参数等密切相关. 因此, 可利用 (10a) 和 (10b) 式分析载流子输运参数、太阳能电池的结构参数、掺杂浓度、阻抗特性及调制激光参数等对少数载流子辐射复合发光的幅频与相频特性的影响, 在给定调制激光参数与太阳能电池结构的条件下, 也可利用幅频与相频特性检测载流子输运参数、掺杂浓度及阻抗特性等.

3 仿真分析

本文采用建立调制激光诱发太阳能电池少数载流子密度波理论模型仿真分析电池掺杂浓度 N_a 和 N_d 、阻抗特性及载流子输运参数对载流子辐射复合产生红外辐射信号频域响应特性的影响. 设单晶硅太阳能电池的基极为 p 型半导体基体厚度 $L = 300 \mu\text{m}$; 发射极为 n 型半

导体, 其厚度 $d = 0.3 \mu\text{m}$. 室温平衡状态下 n 区的掺杂浓度 $N_d = 1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$, p 区的掺杂浓度 $N_a = 1 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$. 调制激光最大光强 $I_0 = 3 \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$, 波长 $\lambda = 808 \text{nm}$, 激光光斑半径 $400 \mu\text{m}$, 吸收系数 $\beta = 838.7 \text{cm}^{-1}$, 表面反射率 $R = 0.02$, 发射极载流子寿命 $5 \mu\text{s}$, 扩散系数 $2 \text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$, 前表面复合率 $1000 \text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 基极载流子寿命 $10 \mu\text{s}$, 扩散系数 $10 \text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$, 表面复合率 $1000 \text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$. 分别对掺杂参数、阻抗参数和载流子参数进行仿真分析, 表 1 给出了单因素变化仿真分析的太阳能电池面积、掺杂浓度和电阻参数, 下划线的参数为基本参数.

图 3—图 8 分别给出了电池面积 S_c 、施主浓度 N_d 、受主浓度 N_a 、并联电阻 R_{sh} 以及电容旁路电阻 R_{ch} 与势垒电阻 R_{cs} 对少数载流子密度波的幅频与相频响应特性的影响及规律. 由图可知, 在给定激光调制频率范围内 (10Hz — 100kHz), 调制激光诱发太阳能电池少数载流子辐射复合发光 PCR 信号的幅频与相频特性曲线存在两个转折频率 f_{c1} 和 f_{c2} (这里称为 PCR 频响特性曲线的双弯曲), f_{c1} 与 f_{c2} 的定义如图 3(a) 和 (b) 所示, 幅值图中 f_{c1} 为第一条线段切线与第二段切线交点位置, 并设第二直线段切线与第一直线段切线和第三直线段切线交点位置的幅值差为 $\Delta Am1$, 相位图中 $\Delta Ph1$ 与幅值图中采用相同的定义方式, f_{c2} 的位置定义为第三直线切线与第四直线切线交点位置.

由图 3(c) 和 (d) 可知, 面积为 $15.6 \text{cm} \times 15.6 \text{cm}$ 的太阳能电池, 调制激光诱发 PCR 的幅频与相频曲线可以明显观察到双弯曲现象, 随着电池面积减小, 转折频率 f_{c1} 逐渐向高频段移动, $\Delta Am1$ 与 $\Delta Ph1$ 也逐渐减小, 而对转折频率 f_{c2} 几乎无影响. 面积减小到一定数值 (图中为 $6 \text{cm} \times 6 \text{cm}$), 在幅频与相频曲线中仅存在一个转折频率 f_{c2} . 太阳能电池的电容与面积成正比, 当太阳能电池面积较小时, 在调制激光的激励下, 太阳能电池表现的容抗效应并不明显, 当太阳能电池面积大于 $9 \text{cm} \times 9 \text{cm}$ 时, 其电容效应变得不能忽略.

表 1 仿真分析的太阳能电池面积、掺杂浓度和电阻参数

电池面积 S_c/cm^2	施主浓度 N_a/cm^3	受主浓度 N_d/cm^3	电阻 1 R_{cs}/Ω	电阻 2 R_{ch}/Ω	并联电阻 R_{sh}/Ω
6 × 6	1×10^{15}	1×10^{14}	1000	0.02	1500
9 × 9	1×10^{16}	1×10^{15}	1500	0.03	1750
12.5 × 12.5	1×10^{17}	1×10^{16}	2000	0.04	2000
15.6 × 15.6	1×10^{18}	1×10^{17}	3000	0.05	2500

由图4与图5可知,施/受主浓度的变化仅改变 f_{c1} 的位置,而几乎不影响 f_{c2} ,当施/受主浓度增大时, f_{c1} 向低频移动, f_{c1} 处的幅值减小,相位不变,但施主和受主浓度对PCR幅频与相频的影响程度是不一致的,受主浓度相比施主浓度对PCR幅频与相频响应的影响更加明显.这主要是由于基极深度是发射极的几万倍,而PCR信号是深度积分,因此导致PCR信号对发射极掺杂浓度的灵敏度不高.

由图6可知,并联电阻变化不改变 f_{c1} 和 f_{c2} 的位置,仅改变 $\Delta Am1$ 和 $\Delta Ph1$ 的大小.并联电阻增大时,幅值差值 $\Delta Am1$ 变大,相位差值 $\Delta Ph1$ 也变大,而其他频率位置的幅值和相位几乎没有改变.

这主要是因为并联电阻作为一个有功能量耗散源,在频域下只能改变有功功率的大小,不会改变电压和电流相位的频率位置,即不改变PCR信号相位的频率位置.

图7和图8给出了电容旁路电阻 R_{ch} 与势垒电阻 R_{cs} 对PCR幅频与相频特性的影响.由图7和图8可知, R_{ch} 和 R_{cs} 均会引起PCR幅值差 $\Delta Am1$ 和相位差 $\Delta Ph1$ 的变化, R_{ch} 的影响与并联电阻 R_{sh} 的影响基本相同. R_{ch} 增大,幅值差 $\Delta Am1$ 和相位差 $\Delta Ph1$ 均增大,幅值变大. R_{cs} 增大, f_{c1} 向低频移动,幅值差 $\Delta Am1$ 和相位差 $\Delta Ph1$ 均增大.

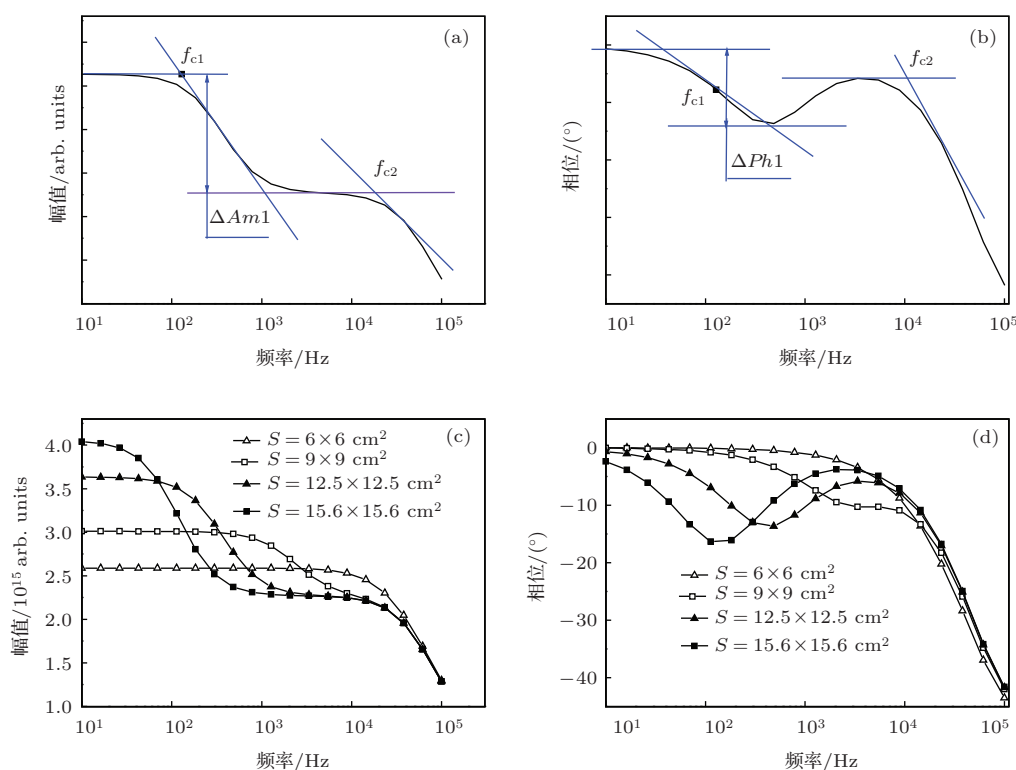


图3 面积对太阳能电池的PCR幅频-相频响应影响及频率点示意图 (a)幅值图中频率转折点示意图; (b)相位图中频率转折点示意图; (c)不同面积电池的幅值图; (d)不同面积电池的相位图

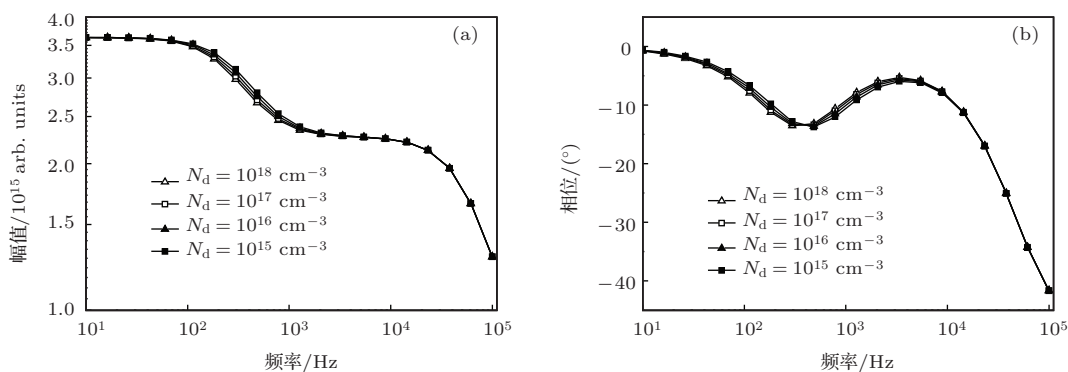


图4 施主浓度对PCR幅频-相频频域响应的影响 (a)幅频特性; (b)相频特性

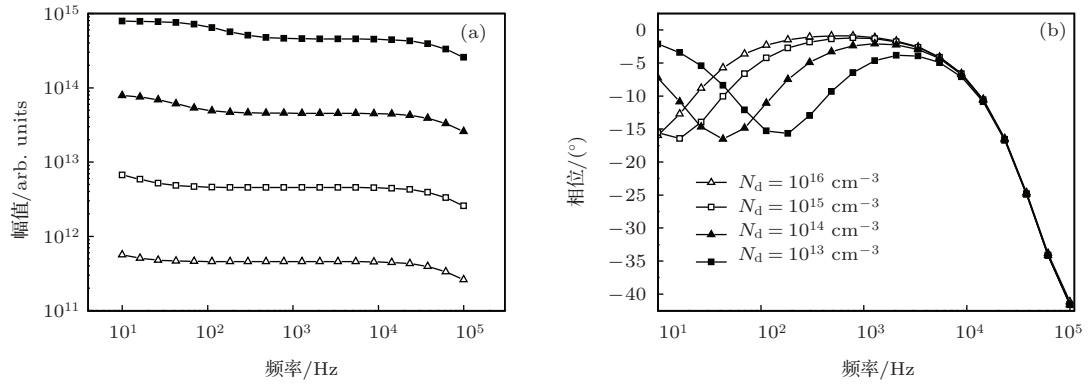


图5 受主浓度对PCR幅频-相频响应的影响 (a)幅频特性; (b)相频特性

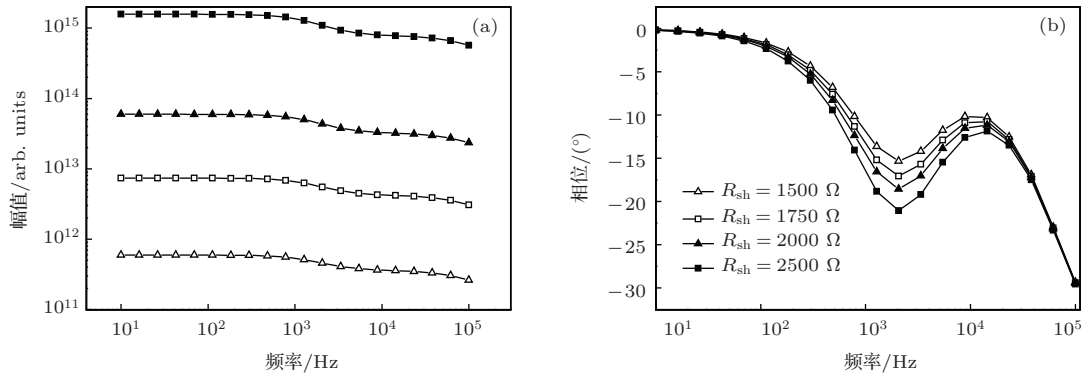


图6 并联电阻 R_{sh} 对太阳能电池PCR幅频-相频响应的影响 (a)幅频特性; (b)相频特性

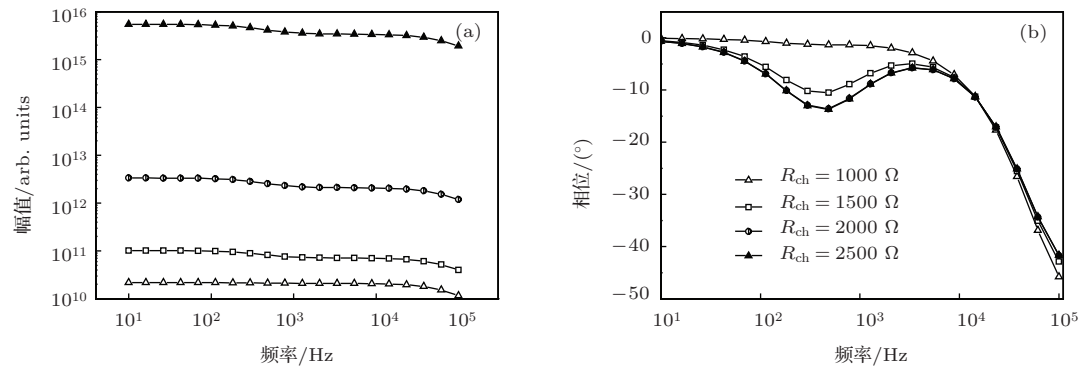


图7 电容旁路电阻 R_{ch} 对PCR幅频-相频响应的影响 (a)幅频特性; (b)相频特性

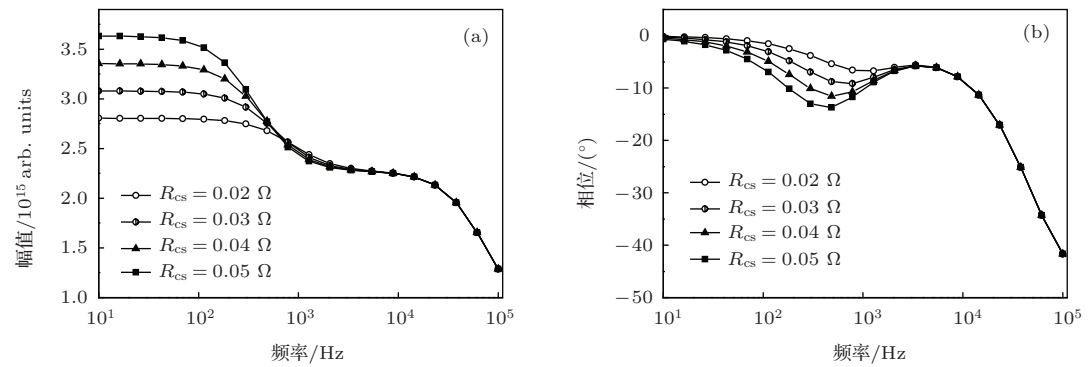


图8 势垒电阻 R_{cs} 对PCR幅频-相频响应的影响 (a)幅频特性; (b)相频特性

表2给出了仿真分析的基极载流子输运参数, 图9—图11分别是面积为 $12.5\text{ cm} \times 12.5\text{ cm}$ 的太阳能电池载流子寿命 τ_n 、扩散系数 D_n 及表面复合率 S_n 对PCR幅频-相频响应的影响. 由图9—图11可知, 载流子寿命对 f_{c1} 的位置有影响, 寿命增大, f_{c1} 略微向低频段移动, 而扩散系数和表面复合率对 f_{c1} 的位置几乎没有影响. 载流子输运参数对 f_{c2} 的位置影响较为明显, 这与小面积太阳能电池PCR的结果是一致的. 由于太阳能电池发射极载流子输运参数与基极输运参数对PCR信号的频域响应影响具有相似性, 发射极部分的影响不再赘述.

从仿真分析可知, 载流子输运参数对 f_{c2} 的位

置影响较大, 而对 f_{c1} 的位置影响很小. 太阳能电池的掺杂浓度(施主/受主浓度)及其阻抗电阻对 f_{c1} 的位置影响明显, 对 f_{c2} 的位置影响很小. 主要体现在施主/受主浓度的变化影响 f_{c1} 的位置, 而不影响幅值差 $\Delta Am1$ 和相位差 $\Delta Ph1$ 的大小, 并联电阻不影响 f_{c1} 的位置, 而改变了幅值差 $\Delta Am1$ 和相位差 $\Delta Ph1$ 的大小. 因此, 可通过 f_{c1} 的位置及其位置的频域响应特性值测定太阳能电池的掺杂浓度与阻抗电阻.

表2 仿真分析的载流子输运参数

$\tau_p/\mu\text{s}$	$D_p/\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$	$S_p/\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$
10,30,50	10,50,90	10,100,200

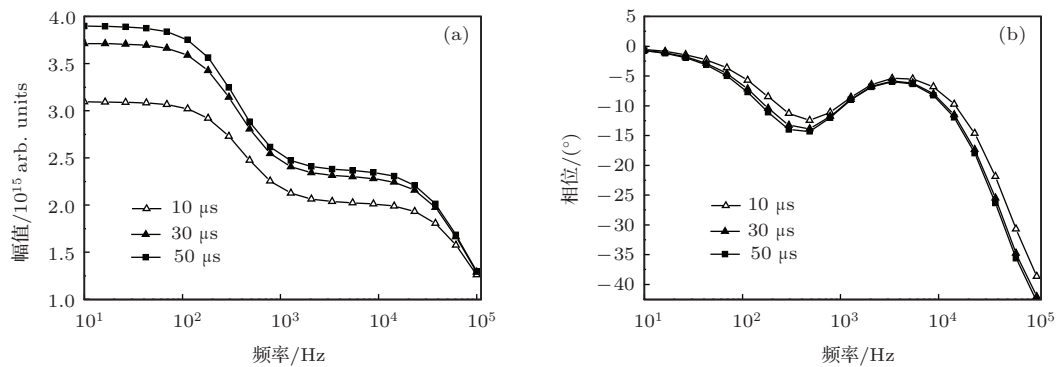


图9 寿命对太阳能电池频域响应的影响 (a) 幅频特性; (b) 相频特性

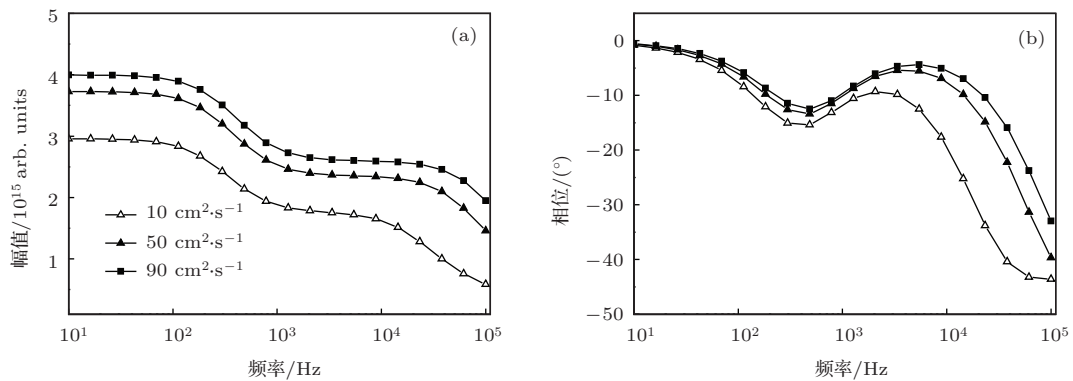


图10 扩散系数对太阳能电池频域响应的影响 (a) 幅频特性; (b) 相频特性

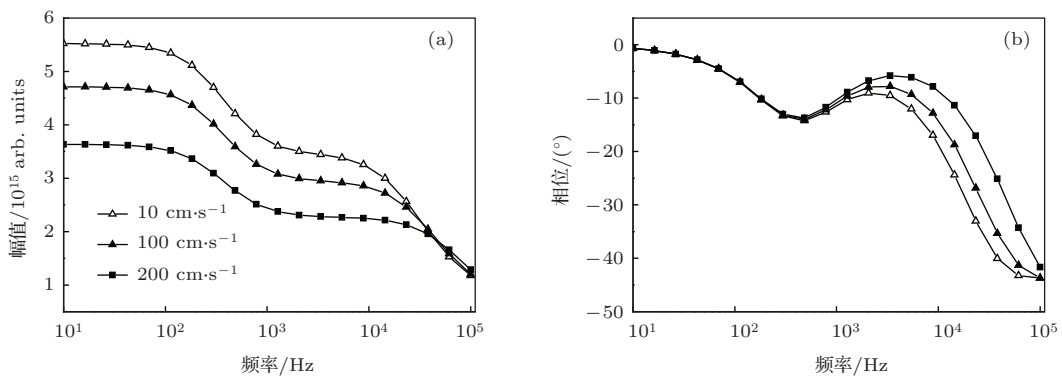


图11 表面复合率对太阳能电池频域响应的影响 (a) 幅频特性; (b) 相频特性

4 实验结果分析

实验装置如图 12 所示. 一束光子能量大于硅半导体禁带宽度、光强按正弦规律调制的抽运光 (808 nm) 经聚焦后照射到太阳能电池片表面, 在太阳能电池表面附近激发出光生载流子, 载流子复合辐射短波红外光经过一个长通滤波器 (long pass filter, 1000 nm) 后进入 InGaAs 探测元 (探测面积 0.79 mm², 光谱响应带宽 0.9—1.7 μm), 经数字锁相放大器 (SR830) 运算后输出载流子辐射信号的幅值和相位, 所使用样品为 12.5 cm × 12.5 cm 单晶硅太阳能电池片, 图 12 (b) 为电池测试区域的扫描检测红外成像图, 其中 A, B, C 三个位置作为测

试点.

图 13 给出了通过频率扫描得到的 PCR 幅频与相频响应特性和利用 (10a) 和 (10b) 式得到的拟合曲线.

由图 13 可知, PCR 的幅频与相频特性均具有两个拐点 (双弯曲), 这与本文所建立的模型仿真分析结果是符合的, 同时实验结果与多参数拟合符合良好. A, B, C 三个位置最佳的拟合结果如表 3 所示. 从拟合结果可知, 载流子输运参数的拟合存在一定的差异, 施主/受主浓度的拟合值均保持在相同量级上, 并且与电池制作厂家提供的平均掺杂浓度 10¹⁷—10¹⁸ cm⁻³ 和 10¹⁴—10¹⁵ cm⁻³ 是符合的, 而并联电阻拟合值的差异 < 2%. 这是因为不同位

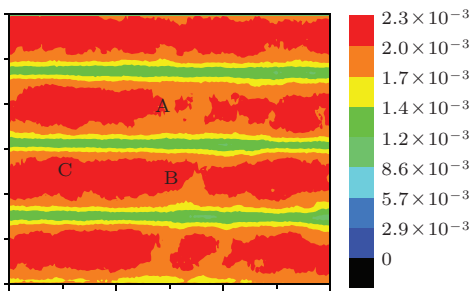
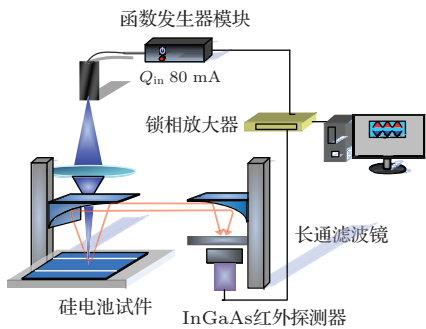


图 12 (网刊彩色) 实验装置图及试件图

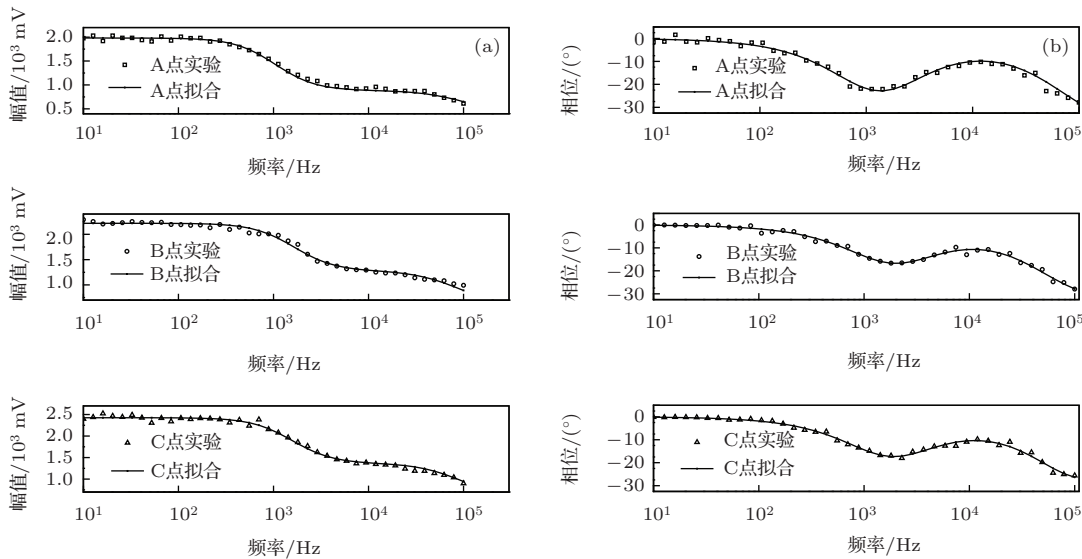


图 13 试验测量与拟合结果 (a) 幅频特性; (b) 相频特性

表 3 参数测量结果

	P 区			N 区			掺杂浓度		电阻参数		
	$\tau_n/\mu\text{s}$	$D_n/\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$	$S_n/\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	$\tau_p/\mu\text{s}$	$D_p/\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$	$S_p/\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	N_d/cm^{-3}	N_a/cm^{-3}	R_{cs}/Ω	$R_l/\Omega\cdot\text{cm}^{-2}$	R_{sh}/Ω
A	2.51	0.76	695.3	5.26	42.4	878.8	5.5×10^{17}	1.1×10^{15}	910	0.16	2054
B	2.73	0.84	725.2	5.61	38.1	903.1	4.8×10^{17}	1.1×10^{15}	922	0.15	2021
C	2.75	0.73	686.8	5.81	43.9	867.3	6.5×10^{17}	1.2×10^{15}	935	0.14	2068

置的载流子输运参数具有空间分布差异性, 而掺杂浓度和并联电阻的值则相对稳定. 因此, 本文方法在测量并联电阻时具有较好的精度, 对于掺杂浓度可以较为准确地测定其量级.

5 结 论

本文建立了调制激光诱发硅太阳能电池的少数载流子密度波数学模型, 并利用PCR检测掺杂浓度、阻抗及载流子输运参数. 仿真分析了不同掺杂浓度、阻抗电阻和载流子传输参数对频响曲线拐点的影响. 仿真结果表明, 载流子输运参数对转折频率 f_{c2} 的位置影响较大, 而对转折频率 f_{c1} 的位置影响很小. 施主/受主浓度和并联电阻对转折频率 f_{c1} 的位置影响较明显, 对转折频率 f_{c2} 的位置影响很小, 主要体现在影响施主/受主浓度的变化影响转折频率 f_{c1} 的位置, 而不影响其对应的幅值差

$\Delta Am1$ 和相位差 $\Delta Ph1$ 的大小, 并联电阻不影响转折频率 f_{c1} 的位置, 而仅改变了幅值差 $\Delta Am1$ 和相位差 $\Delta Ph1$ 的大小. 通过PCR频域扫描试验验证了理论分析的正确性, 结果表明, PCR检测大面积太阳能电池频响曲线的双弯曲是由电容效应所引起的, 通过多参数拟合检测了单晶硅太阳电池的施/受主浓度、并联电阻和载流子输运参数, 表明本文所建立的模型能够用于分析与计算太阳能电池的掺杂浓度、阻抗电阻与载流子输运参数, 进一步拓宽了PCR测量的参数范围.

附录 A

过剩少数电子与空穴密度波扩散长度可由下式计算.

$$L_{\omega n} = \sqrt{D_n \tau_n / (1 + i\omega \tau_n)},$$

$$L_{\omega p} = \sqrt{D_p \tau_p / (1 + i\omega \tau_p)}.$$

(8) 式中的系数系:

$$a_n = \frac{\beta(1-R)I_0\eta_E L_{\omega n}^2}{D_n \hbar \omega_{in} \cdot (1 - \beta^2 L_{\omega n}^2)},$$

$$a_p = \frac{\beta(1-R)I_0\eta_E L_{\omega p}^2}{D_p \hbar \omega_{in} \cdot (1 - \beta^2 L_{\omega p}^2)},$$

$$c_{n1} = n_0(e^{qV/k_B T} - 1) - a_n e^{-\beta(d-w_p)},$$

$$c_{p1} = p_0(e^{qV/k_B T} - 1) - a_p e^{-\beta(d+w_n)},$$

$$c_{n2} = \frac{c_{n1}\{S_n \cosh[(d-w_p)/L_{\omega n}] + D_n/L_{\omega n} \sinh[(d-w_p)/L_{\omega n}]\} - a_n \cdot (S_n + \beta D_n)}{S_n \sinh[(d-w_p)/L_{\omega n}] + D_n/L_{\omega n} \cosh[(d-w_p)/L_{\omega n}]},$$

$$c_{p2} = \frac{-a_p \cdot [(S_p - \beta D_p) e^{-\beta(L+d)}] - c_{p1}\{S_p \cosh[(L-w_n)/L_{\omega p}] + D_p/L_{\omega p} \sinh[(L-w_n)/L_{\omega p}]\}}{S_p \sinh[(L-w_n)/L_{\omega p}] + D_p/L_{\omega p} \cosh[(L-w_n)/L_{\omega p}]}.$$

参考文献

- [1] Kasemann M, Grote D, Walter B, Kwopil W, Trupke T, Augarten Y, Warta W 2008 *Prog. Photovoltaics* **16** 297
- [2] Davis J R, Rohatgi A, Hopkins R H, Blais P D, Rai-Choudhury P, McCormick J R, Mollenkopf H C 1980 *IEEE Trans. Electron Dev.* **27** 677
- [3] Yi S G, Zhang W H, Ai B, Song J W, Shen H 2014 *Chin. Phys. B* **23** 103
- [4] Chen D S, Yang J, Xu F, Zhou P H, Du H W, Shi J W, Yu Z S, Zhang Y H, Ma Z Q 2013 *Chin. Phys. B* **22** 018801
- [5] Liang L, Xu Q F, Hu M L, Sun H, Xiang G H, Zhou L B 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 037301 (in Chinese) [梁磊, 徐琴芳, 忽满利, 孙浩, 向光华, 周利斌 2013 物理学报 **62** 037301]
- [6] Mandelis A, Batista J, Shaughnessy D 2003 *Phys. Rev. B* **67** 205208
- [7] Li B C, Shaughnessy D, Mandelis A, Batista J, Garcia J 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 7832
- [8] Li B C, Shaughnessy D, Mandelis A 2004 *J. Appl. Phys.* **97** 023701
- [9] Jenny N 2003 *The Physics of Solar Cells* (London: Imperial College Press) pp163-169
- [10] Mandelis A 2001 *Diffusion Wave Fields Mathematical Methods and Green Functions* (New York: Springer) pp588-593
- [11] Chawla B R, Gummel H K 1971 *IEEE Trans. Electron Dev.* **18** 178
- [12] Buh G H, Chung H J, Kim C K, Yi J H, Yoon I T, Kuk Y 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 106

Infrared radiation dynamic response and parametric analysis for silicon solar cell using photocarrier radiometry

Liu Jun-Yan¹⁾ Qin Lei¹⁾ Song Peng¹⁾ Gong Jin-Long¹⁾ Wang Yang^{1)†} A. Mandelis²⁾

1) (School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

2) (Center for Advanced Diffusion Wave Technologies (CADIFT), Mechanical and Industrial Engineering, University of Toronto, Toronto, Ontario M5S 3G8, Canada)

(Received 31 May 2014; revised manuscript received 25 July 2014)

Abstract

An analytic mathematical model of modulated laser-induced minority carrier density wave of silicon solar cells is developed, and light-induced carrier recombination radiation luminescence method (photocarrier radiometry (PCR)) is employed to detect the doping concentration, impedance and carrier transport parameters. The double knee characteristics of frequency domain response curve are investigated, and in a small ac signal case, the equivalent circuit topology structure of a solar cell is constructed. Through simulation analysis based on minority carrier density wave mathematical model, the effects of doping concentration, resistance and carrier transport parameters on the PCR frequency domain response are investigated. Donor/acceptor concentration, shunt resistance and carrier transport parameters of Si solar cell are obtained by PCR frequency-scanning experiments and multi-parameter fitting. The results show that the first knee position of PCR-detected large-area solar-cell frequency domain response curve is determined by the capacitive effect. The simplified mathematical model can be used to quantitatively describe and determine the doping concentration, shunt resistance and carrier transport parameters of silicon solar cell.

Keywords: photocarrier radiometry, frequency scanning, p-n junction capacitor, parameter measurement

PACS: 78.20.Ci, 72.20.Jv, 07.60.Dq

DOI: 10.7498/aps.63.227801

† Corresponding author. E-mail: wyyh@hit.edu.cn